

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



ارزیابی خواص مکانیکی بتن با جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های ریز و درشت بازیافتی*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.77651.1164

عارف سرهنگی[۱] فریدون امیدی نسب[۲] احمد دالوند[۳]

چکیده *سنگدانه‌های بتنی بازیافتی یکی از انواع سنگدانه‌های بازیافتی است که بیشترین فراوانی را نسبت به سایر سنگدانه‌های بازیافتی دارد. در این تحقیق با ا ستفاده از جایگزینی سنگدانه‌های بتنی بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی، خ صو صیات مکانیکی این نوع بتن‌ها مورد برر سی قرار گرفته ا ست. جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی در چهار درصد ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤٥ انجام شد و این جایگزینی هم به صورت مستقل (شن یا ماسه به‌صورت مجزا) و هم به صورت همزمان (هم شن و هم ما سه با هم) انجام شد. با توجه به ا ستفاده ۵۰ در صد شن و ۵۰ در صد ما سه در طرح اختلاط مرجع و با جایگزینی درصدهای فوق‌الذکر با سنگدانه‌های درشت و ریز بتنی بازیافتی تعداد ۲۱ طرح اختلاط مورد استفاده قرار گرفت. نسبت آب به سیمان در همه طرح‌های اختلاط ثابت نگه دا شته و برابر با ۰/٤۲ در نظر گرفته شد. برای جبران کاهش مقاومت نا شی از جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، از میکروسیلیس در درصدهای مختلف ۷،۵ و ۱۵ و فوق روان کننده در طرح‌های اختلاط اســتفاده شــد. با انجام آزمایش‌های مختلف، خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی مورد بررســی قرار گرفت. نتایج نشــان داد که بهترین طرح اختلاط از نظر مقاومت فشــاری، طرح حاوی ۷/۵٪ میکروســیلیس و ۱۵٪ شــن بازیافتی، از نظر مقاومت کشــشــی، طرح حاوی ۷/۵٪ میکرو سیلیس و ٤٥٪ شن بازیافتی، از نظر مقاومت خم شی، طرح حاوی ۷/۵٪ میکرو سیلیس و ۳۰٪ شن بازیافتی، طرح حاوی ۱۵٪ میکرو سیلیس و ۱۵٪ شن بازیافتی م شخص شدند. با برر سی چندمتغیره خواص مکانیکی نمونه‌های بتن، م شخص گردید که طرح‌های اختلاط بازیافتی حاوی ۱۵٪، ۳۰٪ شن بازیافتی و ٤٥٪ ما سه بازیافتی با ۷/۵٪ میکرو سیلیس و همچنین طرح اختلاط ۱۵٪ ما سه بازیافتی با ۱۵٪ میکرو سیلیس، در بین طرح‌های اختلاط بازیافتی، بی شترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند.*

واژه‌های کلیدی سنگدانه بازیافتی، سنگدانه طبیعی، مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

Evaluation of Mechanical Properties of Concrete by Replacing Natural Aggregates with Fine and Coarse Recycled Aggregates

Aref Sarhanghi Fereydoon Omidinasab Ahmad Dalvand

Abstract *Recycled concrete aggregates are one of the types of recycled aggregates that have the most abundance compared to other recycled aggregates. In this research, by using the replacement of recycled concrete aggregates instead of natural aggregates, the mechanical properties of this type of concrete have been investigated. The replacement of natural aggregates with recycled aggregates was done in four percentages of 0, 15, 30 and 45, and this replacement was done both independently (i.e. sand or gravel separately) and simultaneously (both sand and gravel together). According to the use of 50% sand and 50% sand in the reference mixing plan and by replacing the percentages with coarse and fine recycled concrete aggregates, 21 mixing plans were used. The ratio of water to cement was kept constant in all mixing plans and was considered equal to 0.42. To compensate for the decrease in strength due to the replacement of recycled aggregates, micro silica in different percentages of 7.5 and 15 and super plasticizers were used in the mixing designs. By performing various tests, the mechanical properties of concrete samples were investigated. The results showed that the best mixing design in terms of compressive strength is the design containing 7.5% micro silica and 15% recycled sand, in terms of tensile strength, the design containing 7.5% micro silica and 45% recycled sand, in terms of flexural strength, the design containing 7.5% micro silica and 30% recycled sand, the plan containing 15% micro silica and 15% recycled sand was determined. By examining the mechanical properties of concrete samples, it was determined that the recycled mixing plans contain 15%, 30% recycled gravel and 45% recycled sand with 7.5% microsilica, as well as the mixing plan of 15% recycled sand with 15% microsilica. , among the recycled mixing plans, they had the highest amount of overall utility.*

Key words Recycled aggregate, natural aggregate, flexural strength, compressive strength, tensile strength.

* تاریخ دریافت مقاله۱٤۰۱/٤/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۹/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان.

(۲) نویسنده مسئول دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان.

(۳) دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان.

Email: omidinasab.f@lu.ac.ir

مقدمه

بتن یکی از متداولترین و پرمصرفترین مصالح ساختمانی است [1]. از کاربردهای بتن می‌توان در ساخت جاده‌ها، پل‌ها و سدها نام برد. جزء اصلی بتن سنگدانه است که حدود ۷۵ درصد حجم کل آن را تشکیل می‌دهد و آن را به تنها جزء مهم در تعیین خصوصیات کلی بتن تبدیل می‌کند [2]. تولید بتن مستلزم تهیه اجزایی است که از منابع طبیعی به دست آمده و آن را برای محیط‌زیست خطرناک می‌کند [3]. به دست آوردن سنگدانه باعث اختلال در معادن و در نتیجه کاهش منابع کمیاب می‌شود. یک جایگزین محبوب استفاده از سنگدانه بازیافتی (Recycle Aggregate) (RA) به دست آمده از زباله‌های بتن است. در چند دهه اخیر، سازه‌های بسیاری در خاورمیانه در طی رشد اقتصادی منطقه ساخته شده است. با این حال، این سازه‌ها به دلیل پایان عمر مفید خود در حال تخریب هستند. دلیل اصلی تخریب‌ها، عدم رعایت مشخصات سازه‌ها در زمان ساخت است. تخریب سازه‌ها منجر به ایجاد قلوه‌سنگ‌های بتنی می‌شود که می‌تواند بیشتر خرد شود و سنگدانه‌های بازیافتی تولید شود. این سنگدانه‌ها را می‌توان در مخلوط‌های بتن استفاده کرد که از جنبه‌های مختلف سودمند است. مزایای اصلی استفاده از RA کاهش مشکلات زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در منابع کل است [4]. آمارها بیان می‌کنند که ۷۰ درصد از ۱۰۰۰۰ تن زباله عمومی روزانه دبی نتیجه ضایعات ساختمانی و تخریب است [5].

برخی از مطالعات نشان دادند که با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بتنی بازیافتی RCA و طرح اختلاط بتن برای نسبت آب به سیمان کمتر، بتن با مقاومت بالاتری حاصل می‌گردد [6–10]. جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های ریز با افزودن مواد معدنی می‌-تواند به‌عنوان یک استراتژی برای افزایش مقاومت فشاری بتن سنگدانه بازیافتی مورد استفاده قرار گیرد [11]. در تحقیقی امکان جایگزینی سنگدانه‌های ریز طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی در بتن مورد بررسی قرار گرفت. میزان جایگزینی سنگدانه‌های ریز طبیعی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ وزنی بود. مقاومت کششی، فشاری و خمشی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در ۲۸ روز عمل‌آوری، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و خمشی بتن به‌شدت تحت تأثیر درصد سنگدانه‌های بازیافتی قرار دارد. مشخص شد که با افزایش مقدار سنگدانه بازیافتی، مقاومت به‌صورت خطی کاهش یافت؛ بنابراین برای استفاده از ضایعات بازیافتی بتن به عنوان سنگدانه‌های ریز، لازم است تحقیقات تکمیلی با افزودنی‌های مناسب برای جبران افت مقاومت فشاری و خمشی انجام شود [12]. چندین مطالعه گزارش کردند که مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه بازیافتی (Recycle Aggregate Concrete) (RAC) به‌خصوص در مقاومت ۲۸ روزه، بالاتر از بتن مشابه ساخته شده توسط سنگدانه طبیعی به میزان ۲۵٪+ است، [13]. در تحقیقاتی ثابت شد که سطح رطوبت کل می‌تواند مقاومت را تا ۲۰٪ افزایش دهد یا آن را تا ۳۰٪ در صورت جایگزینی با ۱۰۰ درصد RA کاهش دهد، مقاومت فشاری نیز به طور قابل توجهی تحت تأثیر نسبت آب به سیمان قرار دارد [14 - 15]. سطح ادغام RA بر خواص مکانیکی RAC تأثیر می‌گذارد. محققان در [16] دریافتند که مقاومت فشاری بتن ۳۰–۴۵ مگاپاسکال با ۲۵ درصد RA درشت با استفاده از همان مقدار سیمان در NA قابل دستیابی است. مدول الاستیسیته RAC در مقایسه با بتن حاوی سنگدانه طبیعی (Natural Aggregate Concrete) (NAC) کمتر بود و مقاومت کششی RAC ممکن است بیشتر از NAC باشد. دلباس و همکاران [17] که اثرات استفاده از دوده سیلیس را با RA مطالعه کردند، به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری ۵٪ و ۱۰٪ دوده سیلیس به ترتیب ۳,۲۳٪ و ۱۲,۹٪ در مقایسه با RAC با ۰٪ دود سیلیس افزایش می‌یابد. افزایش قابل توجه مقاومت فشاری بتن با جایگزینی دوده سیلیس به اثر پرکننده همراه با اثر پوزولانی نسبت داده می‌شود [18]. چندین مطالعه بیان کردند که اگر RA تا ۳۰٪ با سنگدانه‌های درشت طبیعی جایگزین شود، خواص مکانیکی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند [19, 21-23]. از سوی دیگر، مطالعه انجام شده توسط [24] نشان داد که جایگزینی تمام سنگدانه‌های درشت با ۱۰۰ درصد RA کمترین تأثیر را بر عملکرد دارد. از نظر ارتباط بین مقاومت فشاری و سایر خواص مکانیکی مانند مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و مقاومت کششی، چندین مطالعه، یافته‌ها را گزارش کرده‌اند [25، 24، 20]. از نظر خواص مکانیکی بتن، یونس و مصطفی [26] خواص مکانیکی RAC را با خواص NAC مقایسه کردند. مقاومت فشاری مورد بررسی از ۳۰,۲ تا ۴۱ مگاپاسکال در ۲۸ روز متغیر بود. مقاومت فشاری RAC تقریباً ۸۴ درصد NAC بود. از سوی دیگر، مقاومت کششی ۹۳ درصد NAC بود. یافته‌های مشابهی توسط اسماعیل و همکاران گزارش شده است. در سال ۱۳۸۸ علیرضا خالو و همکارانش[27]

به بررسی ساخت بتن خودتراکم با استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی پرداختند. به‌کارگیری سنگدانه‌های بازیافتی موجب افت خواص رئولوژیک بتن‌های خودتراکم گردید و دستیابی به خواص خودتراکم را دشوار ساخت. جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانهٔ طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی منجر به ساخت بتن خودتراکم مناسبی گردید. در سال ۱۳۸۹ مقیمی و همکارانش[28] نشان دادند که استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده باعث دستیابی به بتن بازیافتی با مقاومت فشاری و کششی بیشتری نسبت به بتن معمولی گردید. بریتو و همکارانش در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که کاربرد مصالح بازیافتی درشت‌دانه باکیفیت بالا تأثیرات ناچیزی نسبت به بتن معمولی دارد [29]. در سال ۲۰۱۷ آپورا [30] با جایگزینی ۲۰٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی در بتن به این نتیجه رسید که استفاده از سنگدانه بازیافتی تنها ٪۱۴ کاهش مقاومت را به دنبال داشته، اما با جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی شاهد کاهش مقاومت ۱۰٪ مقاومت فشاری، ۲۴٪ مقاومت کششی و ۳۴٪ مقاومت خمشی را نشان داد. طبق همین نتایج بیان نمود که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی میزان مقاومت در سنین بالا کاهش می‌یابد.

با جمع‌بندی مرور مطالعات انجام شده، مشخص گردید که بیشتر مطالعات بر روی درصد جایگزینی درشت‌دانه، میزان رطوبت سنگدانه بازیافتی، خواص مکانیکی، کارایی، انقباض، نسبت آب به سیمان در نمونه‌های RAC متمرکز شده و در اکثر این تحقیقات بر روی خواص بتن تازه و سخت شده حاوی درشت‌دانه بتنی بازیافتی انجام شده است و تحقیقات کمی بر روی جایگزینی ریزدانه بتنی بازیافتی انجام شده است. نوآوری پژوهش حاضر به این صورت است که سه گروه نمونه RAC با جایگزینی ریزدانه بتنی بازیافتی، جایگزینی درشت‌دانه بتنی بازیافتی و جایگزینی همزمان ریزدانه و درشت‌دانه بتنی بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی در مقادیر ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد انجام شد. برای جبران افت خواص مکانیکی RAC مقادیر ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان شد. علاوه بر خواص مکانیکی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی نمونه‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت.

برنامه آزمایشگاهی

بازیافت. برای بازیافت مصالح سنگدانه از نمونه‌های بتنی ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر موجود در آزمایشگاه‌های بتن شهر خرم‌آباد با عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شد و این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سنگ‌شکن خرد شده و در اندازه‌های ریز و درشت جداسازی شده و در نهایت در آزمایشگاه دانشگاه و با دانه‌بندی آنها با انجام آزمایش الک، در اندازه‌های شن و ماسه الک شده و مورداستفاده قرار گرفت. در شکل (۱) سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی نشان‌داده‌شده است.

مصالح. سیمان استفاده شده در تحقیق، سیمان پرتلند نوع II بوده و وزن مخصوص و سطح مخصوص سیمان مصرفی به ترتیب ۳/۱ g/cm^3 و ۳۰۰۰ cm^2/g می‌باشد که منطبق بر آیین‌نامهٔ ACI-318-14 [31] و بر اساس استاندارد ASTM C150/C150M-17 [32] می‌باشد. در جداول (۱ و ۲) به ترتیب، آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده‌است. دو نوع سنگدانه مختلف شامل یک نوع (NA سنگدانه طبیعی) و یک نوع (RA سنگدانه بازیافتی از نخاله‌های بتنی) با عیار ۴۰۰ استفاده شد. این سنگدانه‌ها با دانه‌بندی یکسانی تهیه شدند. همچنین میکروسیلیس مورد استفاده تولید کارخانه ازنا در استان لرستان است. از افزودنی‌های روان‌ساز کربوکسیلاتی به عنوان فوق روان کننده در همه طرح‌های اختلاط نیز استفاده شده است.



(الف) (ب) (ج) (د) (و)

شکل ۱ سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی و میکروسیلیس: الف) شن طبیعی، ب) ماسه طبیعی، ج) شن بازیافتی، د) ماسه بازیافتی، و) میکروسیلیس

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	CaO.f	Cl	L.O.I
(٪)	21.5	5.1	4.4	63.2	1.75	2.1	- - -	- - -	0.75	- - -	1.05

جدول ۲ مشخصات فیزیکی سیمان

بلین (cm^2/gr)	باقی‌مانده روی الک ۹۰ میکرون (Seive # 170)	انبساط طولی	درصد آب	زمان‌گیرش اولیه (min)	زمان‌گیرش نهایی (min)
3000	-	0.03	- - -	130	215

خصوصیات NA و RA . سنگدانه‌ها از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل دهنده بتن هستند که خصوصیات آنها نقش به‌سزایی در رفتار بتن دارد. چگالی و جذب آب دو پارامتر مهم در بررسی خصوصیات سنگدانه‌ها هستند. این دو پارامتر برای NA و RA محاسبه شدند. وزن مخصوص سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی (NA و RA) به ترتیب ۲/۶۵ و ۲/۵٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب بودند [31]. این نتایج نشان دهنده آن است که وزن مخصوص RAکمتر از وزن مخصوص NA است. به جهت تعیین میزان ملات چسبیده به سطح RA آیین‌نامه مشخصی وجود ندارد. چندین پیشنهاد برای به دست آوردن مقدار ملات چسبیده به سطح RA وجود دارد که در این تحقیق از روش پیشنهادی Sanchezو Gutierrez [33] استفاده شده است. برای کل سنگدانه‌های بازیافتی بتنی در این تحقیق و قبل از اینکه نمونه‌ها ساخته شود این آزمایش انجام شد، چرا که ملات چسبیده به سنگدانه‌ها، بر روی مقدار جذب آب و چگالی آنها تأثیر خواهد داشت. در این تحقیق چون نمونه‌های سنگدانه‌های بازیافتی بتنی از یک منبع تأمین شده؛ لذا یک نمونه از آن انتخاب شد و این آزمایش روی آن انجام گردید. در صورتی که منبع تهیه سنگدانه‌ها متفاوت باشد بایستی این آزمایش برای هرکدام از آنها انجام گردد. بر مبنای این پیشنهاد نمونه‌ای از RA به مدت ۲ ساعت در آب غوطه‌ور شدند. سپس به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۵۰۰°C خشک و سپس سریعاً در آب سرد قرار داده شدند. نمونه‌ها بعد از سرد شدن با استفاده از چکش لاستیکی به آرامی مالش داده شدند تا ملات چسبیده به سطح آنها جدا شود. بعد از انجام مراحل فوق با گذراندن نمونه از الک شماره ٤ درصد وزنی ملات چسبیده به RA به مقدار ١٤ درصد به دست آمد. جذب آب NA و RA بر اساس ASTM C125 [34] محاسبه شد. میزان جذب آب برای NA و RA به ترتیب ٤/١٦ و ٨/٧٦ درصد به دست آمد. افزایش جذب آب RA نسبت به NA با توجه به ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها منطقی است. همچنین در این تحقیق با استفاده از دستگاه لس‌آنجلس مقاومت مصالح طبیعی و بازیافتی در مقابل سایش و ضربه تعیین و با هم مقایسه شد. این آزمایش بر اساس ASTM C131 [35] انجام شد. میزان ساییدگی برای NA و RA به ترتیب ۲۳/۱۱ و ۲۸/٥٤ درصد به دست آمد. این نتیجه بیانگر آن است که RA در مقابل ساییدگی مقاومت کمتری را نسبت به NA از خود نشان داده است که با توجه به ساختار متخلخل RA و ملات چسبیده به سطح آنها، این نتیجه منطقی است.

طرح اختلاط. طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت نمونه‌های این تحقیق در جدول (۱) نشان داده شده است. متغیرهای این طرح‌های اختلاط شامل درصد جایگزینی ماسه، شن و شن و ماسه NA با RCA، به‌صورت ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد و همچنین میکروسیلیس به مقدار ۷/۵٪ و ۱۵٪ است. مقدار نسبت آب به سیمان و مقدار فوق روان‌کننده برای همه طرح‌های اختلاط ثابت بوده و به ترتیب برابر با ۰/٤۲ و ٤/۲ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. در مجموع تعداد ۲۱ طرح اختلاط برای این تحقیق طراحی گردید. در ادامه جزئیات این طرح‌های اختلاط در جدول (۳) ارائه شده است. ترتیب نام‌گذاری اسامی طرح‌های اختلاط به این صورت است که حرف N و R به معنی سنگدانه طبیعی و بازیافتی است و اعداد جلوی این حروف به ترتیب درصد شن و ماسه است. حرف M هم به معنی میکروسیلیس است. به عنوان مثال طرح اختلاط N50-35 R0-15 M15 به این معنی است که درصد شن و ماسه طبیعی به ترتیب ۵۰ و ۳۵ درصد است و درصد شن و ماسه بازیافتی به ترتیب صفر و ۱۵ درصد است و در این طرح اختلاط مقدار میکروسیلیس هم ۱۵ درصد است. ذکر این نکته لازم است که در طرح اختلاط مرجع درصد سنگدانه طبیعی و بازیافتی ۵۰ درصد و بدون میکروسیلیس در نظر گرفته شده که به‌عنوان طرح اختلاط شمارۀ ۲۱ در جدول فوق ارائه شده است.

در همه طرح‌های اختلاط مقدار سیمان ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت آب به سیمان ۰/۴۲، مقدار فوق روان کننده ۴/۲ کیلوگرم بر متر مکعب است.

ساخت نمونه‌های مقاومت فشاری

نمونه‌های فشاری ساخته شده در این پژوهش به‌صورت مکعبی و دارای ابعاد (۱۰×۱۰×۱۰) سانتی‌متر هستند. در این آزمایش نمونه‌های مکعبی در ۲۱ طرح اختلاط و برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه ساخته شده و در مجموع ۶۳ نمونه برای این تست ساخته شد. برای ساخت نمونه‌ها از قالب پلاستیکی استفاده شده است. نمونه‌ها با استفاده از جک بتن شکن ۲۰۰۰ کیلو نیوتن دیجیتالی و با سرعت بارگذاری ۰/۳ MPa/s مطابق با استاندارد ASTM C39 [36] مورد آزمایش فشاری قرار گرفتند. برای به دست آوردن مقاومت فشاری مشخصه هر نمونه، از سه نمونه (آزمونه) مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای ۶۳ نمونه در جدول (۳) ارائه شده است. مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی (شکست) بتن با استفاده از روابط (۱ و ۲) محاسبه می‌گردند [31]:

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \qquad (۱)$$

$$f_r = 0.62\lambda\sqrt{f_c'} \qquad (۲)$$

نمونه‌های مورد آزمایش و همچنین نحوهٔ شکست نمونه‌ها پس از آزمایش در شکل (۲) ارائه شده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته برخی نمونه‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است.



(الف)	(ب)	(ج)

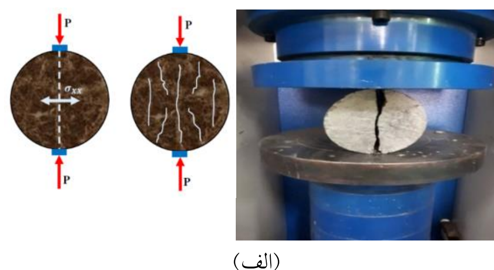
شکل ۲ آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی: الف) نحوهٔ تست، ب) نمونه‌های ساخته شده قبل از آزمایش و ج) نحوهٔ شکست نمونه‌ها بعد از آزمایش

جدول ۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

No.	Mix Design	Compressive Strength (MPa)			
		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean
1	N50-50 R0-0 M7.5	79.4	74.3	59.8	71.17
2	N35-50 R15-0 M7.5	78.6	76.5	81.5	78.87
3	N50-35 R0-15 M7.5	51.3	68.6	41.1	53.67
4	N35-35 R15-15 M7.5	54.3	51.8	63.7	56.60
5	N20-50 R30-0 M7.5	43.9	55.9	72.1	57.30
6	N50-20 R0-30 M7.5	43.2	47.1	56.2	48.83
7	N20-20 R30-30 M7.5	52.3	27.2	51.6	43.70
8	N5-50 R45-0 M7.5	55.0	42.0	18.6	38.53
9	N50-5 R0-45 M7.5	42.3	25.6	56.2	41.37
10	N5-5 R45-45 M7.5	46.8	40.9	57.4	48.37
11	N50-50 R0-0 M15	11.2	33.6	60.2	35.00
12	N35-50 R15-0 M15	40.2	40.5	46.5	42.40
13	N50-35 R0-15 M15	27.0	31.6	27.9	28.83
14	N35-35 R15-15 M15	61.7	46.3	69.0	59.00
15	N20-50 R30-0 M15	43.2	46.1	44.5	44.60
16	N50-20 R0-30 M15	51.9	56.3	62.2	56.80
17	N20-20 R30-30 M15	32.1	38.1	27.5	32.57
18	N5-50 R45-0 M15	48.6	52.3	29.4	43.43
19	N50-5 R0-45 M15	42.6	44.1	61.8	49.50
20	N5-5 R45-45 M15	16.4	24.6	22.0	21.00
21	N50-50 R0-0 M0	32.6	15.3	33.3	27.07

مقاومت کششی بتن (دو نیم شدن)

آزمون مقاومت کششی برزیلی (دو نیم شدن)، مطابق با استاندارد ASTM C496 [37] با سرعت بارگذاری ۰٫۰۵ MPa/s انجام شد. آزمایش با استفاده از یک ماشین تست دیجیتال به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن انجام شد. نمونه‌های ساخته شده، نحوه آزمایش و نحوه شکست نمونه‌ها پس از آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است. این آزمایش بر روی ۲۱ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر انجام شد و نمونه‌ها در ۲۱ طرح اختلاط و برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه ساخته شد که نتایج آن در جدول (۳) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

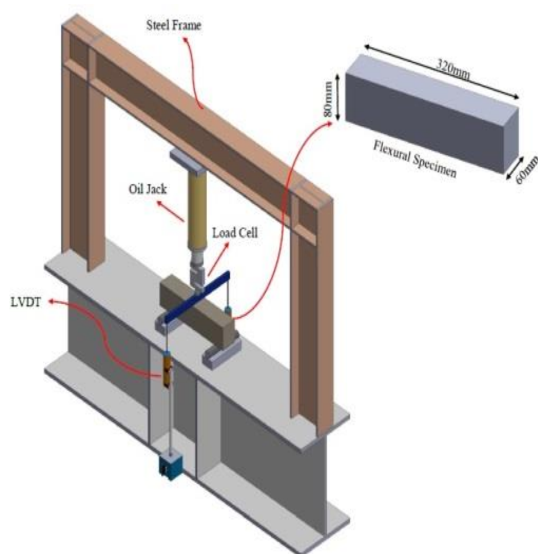
شکل ۳ آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای: الف) نحوهٔ تست، ب) نمونه‌های ساخته شده قبل از آزمایش و ج) نحوهٔ شکست نمونه‌ها بعد از آزمایش

مقاومت خمشی تیرهای منشوری

برای ساخت نمونه‌های خمشی در این تحقیق تیرهای منشوری به ابعاد ٦×٨×٣٢ سانتی‌متر طبق استاندارد ASTM C1609 [38] استفاده شد. تعداد ۳ نمونه برای ۲۱ طرح اختلاط تیرهای منشوری ساخته شد (شکل ٤). جزئیات آزمایش مقاومت خمشی از طریق آزمایش خمش سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) مطابق شکل (٥) نشان داده شده است. نحوه آزمایش و شکست تیرها در شکل (٦) قابل مشاهده است. آزمایش خمش سه نقطه‌ای با یک دستگاه جک به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و جابه‌جایی وسط دهانه با LVDT با طول ۱۵۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج مقاومت خمشی در جدول (٥) ارائه شده است.



شکل ٤ نمونه‌های منشوری (تیر) ساخته شده برای آزمایش مقاومت خمشی



شکل ٥ جزئیات دستگاه و آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

جدول ٤ نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های بتنی

No.	Mix Design	Tensile Strength (MPa)			
		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean
1	N50-50 R0-0 M7.5	7.00	3.99	3.11	4.70
2	N35-50 R15-0 M7.5	5.05	3.39	4.27	4.24
3	N50-35 R0-15 M7.5	4.08	3.45	4.24	3.92
4	N35-35 R15-15 M7.5	4.33	4.27	3.68	4.09
5	N20-50 R30-0 M7.5	4.33	3.49	4.99	4.27
6	N50-20 R0-30 M7.5	3.67	3.36	4.05	3.69
7	N20-20 R30-30 M7.5	3.67	3.74	4.71	4.04
8	N5-50 R45-0 M7.5	5.49	4.52	3.64	4.55
9	N50-5 R0-45 M7.5	3.33	3.80	5.67	4.26
10	N5-5 R45-45 M7.5	3.17	2.73	3.92	3.28
11	N50-50 R0-0 M15	3.96	3.36	2.89	3.40
12	N35-50 R15-0 M15	4.21	4.98	4.11	4.43
13	N50-35 R0-15 M15	4.58	3.64	4.49	4.24
14	N35-35 R15-15 M15	3.05	3.49	2.92	3.15
15	N20-50 R30-0 M15	4.43	3.86	3.80	4.03
16	N50-20 R0-30 M15	4.65	3.14	3.05	3.61
17	N20-20 R30-30 M15	2.61	4.40	2.92	3.31
18	N5-50 R45-0 M15	3.30	4.27	3.55	3.71
19	N50-5 R0-45 M15	2.86	4.05	2.61	3.17
20	N5-5 R45-45 M15	3.49	2.92	3.01	3.14
21	N50-50 R0-0 M0	4.49	3.01	2.76	3.42

جدول ۵ نتایج مقاومت خمشی تیرهای منشوری

No.	Mix Design	Flexural Strength (MPa)			
		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean
1	N50-50 R0-0 M7.5	6.5	7.52	9.26	7.76
2	N35-50 R15-0 M7.5	8.36	6.49	7.24	7.36
3	N50-35 R0-15 M7.5	5.01	6.31	4.59	5.30
4	N35-35 R15-15 M7.5	5.83	5.08	6.56	5.82
5	N20-50 R30-0 M7.5	8.10	6.62	7.93	7.55
6	N50-20 R0-30 M7.5	5.15	7.61	7.24	6.66
7	N20-20 R30-30 M7.5	6.46	5.21	6.31	5.99
8	N5-50 R45-0 M7.5	8.23	5.88	7.55	7.22
9	N50-5 R0-45 M7.5	8.07	8.56	5.16	7.26
10	N5-5 R45-45 M7.5	5.55	6.42	5.32	5.76
11	N50-50 R0-0 M15	8.46	5.52	6.78	6.92
12	N35-50 R15-0 M15	6.13	5.03	7.27	6.14
13	N50-35 R0-15 M15	4.95	5.77	5.27	5.33
14	N35-35 R15-15 M15	7.58	4.73	7.63	6.64
15	N20-50 R30-0 M15	7.16	6.09	7.22	6.82
16	N50-20 R0-30 M15	5.74	6.70	7.06	6.5
17	N20-20 R30-30 M15	7.36	5.93	5.30	6.19
18	N5-50 R45-0 M15	6.10	6.13	7.63	6.62
19	N50-5 R0-45 M15	5.82	6.80	7.34	6.65
20	N5-5 R45-45 M15	5.84	5.31	5.40	5.51
21	N50-50 R0-0 M0	9.04	8.98	7.68	8.56

تجزیه و تحلیل نتایج

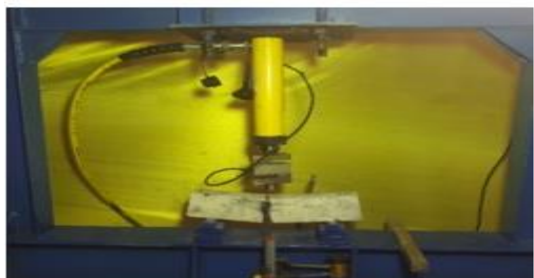
مقاومت فشاری. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها برای ۲۱ طرح اختلاط به دست آمد. این نتایج در جدول (۳) ارائه گردیده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد مقاومت فشاری برای سه آزمونه در هر طرح اختلاط انجام شده است. در شکل (٦-الف) نمودار میله‌ای مقاومت فشاری میانگین سه نمونه در همه طرح‌های اختلاط نشان داده شده است. همان طور که در شکل (٦-الف) و همچنین جدول (۳) مشاهده می‌گردد بیشترین

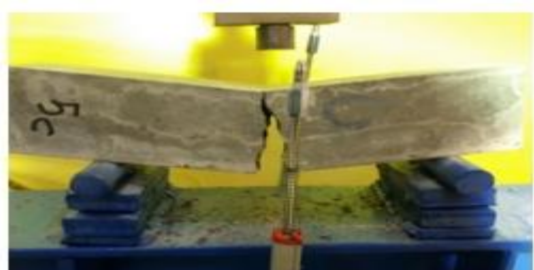
مقدار مقاومت فشاری مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۲ بوده که در آن ۳۵٪ شن طبیعی، ۵۰٪ ماسه طبیعی، ۱۵٪ شن بازیافتی و بدون ماسه بازیافتی است. کمترین مقدار مقاومت فشاری هم مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۲۰ بوده که در آن ۵٪ شن طبیعی، ۵٪ ماسه طبیعی، ٤۵٪ شن بازیافتی و ٤۵٪ ماسه بازیافتی است.

الف) نمونه‌های با ۷/۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه-های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها، کم شده و به ترتیب ۱۵٪، ۳۰٪ و ٤۲٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شماره ۱ کاهش داشته است (شکل ۷–ب). در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش شن بازیافتی و جایگزینی آن با شن طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۵ و ۸، کاهش‌یافته و به ترتیب ۲۰٪ و ٤٦٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است. البته در نمونه با طرح اختلاط شماره ۲، نه‌تنها کاهش نداشته بلکه به مقدار ۱۱٪ مقاومت فشاری افزایش داشته است (شکل ۷–ب). در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش همزمان شن و ماسه بازیافتی و جایگزینی همزمان آن با شن و ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها، کاهش یافته و به ترتیب ۲۱٪، ۳۹٪ و ۳۲٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است (شکل ٦–ب).

با توجه به نتایج فوق، همان طور که انتظار داریم جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی، باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. نتایج نشان می‌دهد در بین سه گروه جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی، گروه جایگزینی ماسه بازیافتی با ماسه طبیعی باعث کاهش بیشتری در مقدار مقاومت فشاری شده است. همچنین گروه جایگزینی شن بازیافتی با شن طبیعی باعث کاهش کمتری در مقاومت فشاری شده است. گروه جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی با شن و ماسه طبیعی از نظر تأثیر بر مقاومت فشاری بین دو گروه فوق قرار گرفته و نسبت به گروه ماسه بازیافتی تأثیر کمتری و نسبت به گروه شن بازیافتی تأثیر بیشتری در کاهش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.











شکل ٦ نحوهٔ آزمایش و شکست نمونه‌های تیر منشوری

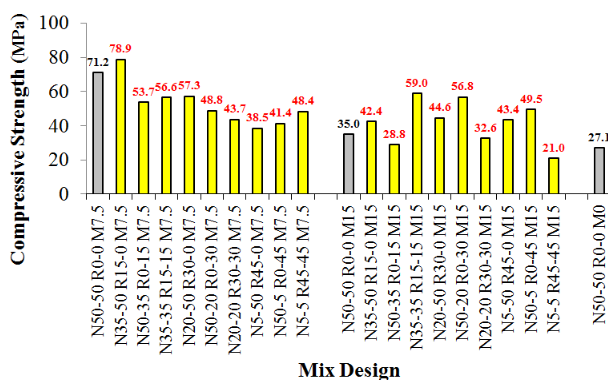
ب) نمونه‌های با ۱۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۱۱ تا ۲۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درصد، مقدار مقاومت فشاری در برخی نمونه‌ها کاهش و در برخی نمونه‌ها افزایش یافته و به ترتیب حدود ۱۸٪ کاهش و ١٦٪ و ۱۹٪ افزایش نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شماره ۱۱) نشان داده شده است (شکل ۷-ج).

با توجه به نتایج فوق مشخص می‌شود که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی همراه با میکروسیلیس، در اکثر نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. نتایج نشان می‌دهد در بین سه گروه جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی، گروه جایگزینی شن بازیافتی با شن طبیعی باعث افزایش بیشتری در مقدار مقاومت فشاری شده است. همچنین گروه جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی با شن و ماسه طبیعی باعث افزایش کمتری در مقاومت فشاری شده است. گروه جایگزینی ماسه بازیافتی با ماسه طبیعی از نظر تأثیر بر مقاومت فشاری بین دو گروه فوق قرار گرفته و نسبت به گروه شن بازیافتی تأثیر کمتری و نسبت به گروه شن و ماسه بازیافتی تأثیر بیشتری را در افزایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد.

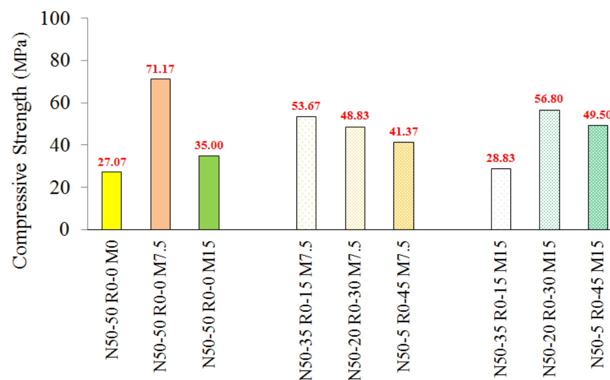
ج) مقایسه نتایج نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس. مقایسه نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی (نمونه‌های با طرح اختلاط شمارهٔ ۱، ۱۱ و ۲۱) نشان می‌دهد که افزایش مقدار میکروسیلیس به مقدار ۷/۵٪ و ۱۵٪، باعث افزایش مقاومت فشاری به مقدار حدود ١٦٠٪ و ۲۹٪ نسبت به نمونه مرجع بدون میکروسیلیس (نمونه با طرح اختلاط شمارهٔ ۲۱) شده است. به عبارتی با افزایش مقدار میکروسیلیس، رشد مقاومت فشاری کاهش داشته است (شکل ۷-د). مقایسه نمونه‌های سه گروه مختلف بازیافتی، حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس (۷/۵٪ و ۱۵٪) نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس، مقاومت فشاری در اکثر نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته در صورتی که در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس، مقاومت فشاری در اکثر نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است (شکل ٦-د). در نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شمارهٔ ۱ و ۱۱) و حاوی ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس، مقدار مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع (نمونه با طرح اختلاط شمارهٔ ۲۱) به ترتیب ١٦٥٪ و ۲۹٪ رشد داشته است. جالب این است که در نمونه با ۷/۵ درصد میکروسیلیس مقدار رشد مقاومت فشاری نسبت به نمونه با ۱۵ درصد میکروسیلیس بیش از ۵ برابر رشد مقاومت داشته است.

در بررسی و مقایسه مقاومت فشاری در گروه شن بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ٤٦٪ کاهش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ۲۲٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ۱۳٪ افزایش داشته است (شکل ٦-و). در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری روندی کاهشی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری روندی تقریباً ثابتی داشته است (شکل ۷-و).

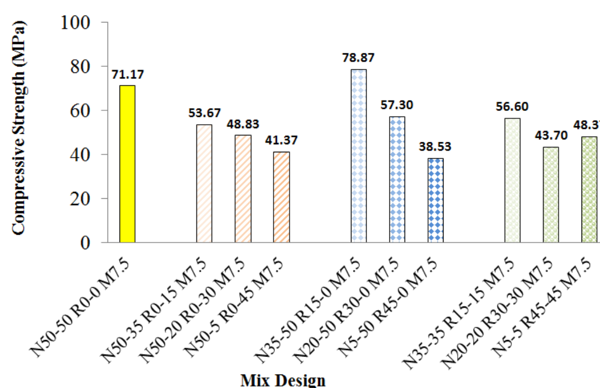
در بررسی و مقایسه مقاومت فشاری در گروه شن و ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ٤٪ افزایش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ۲۵٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ٥٦٪ کاهش داشته است (شکل ٦-ه).



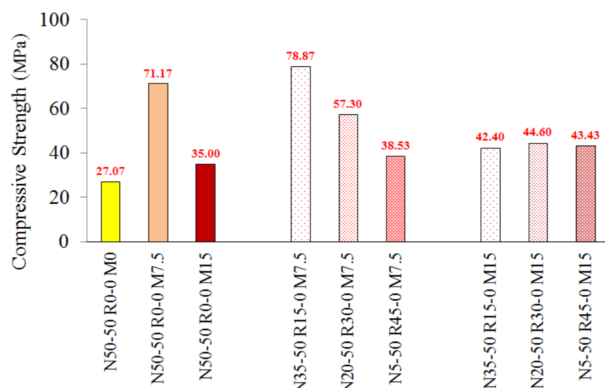
(الف)



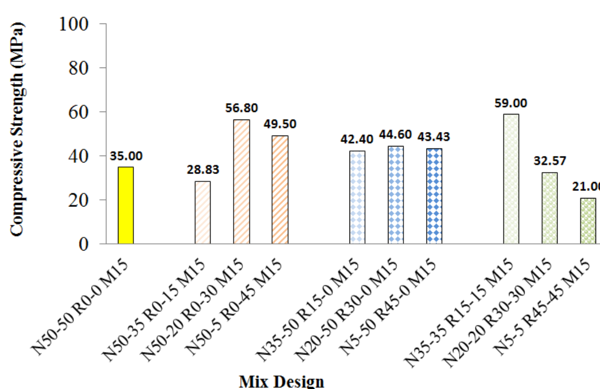
(د)



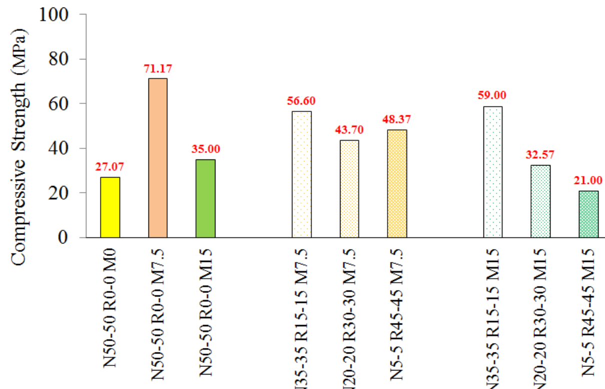
(ب)



(و)



(ج)



(ه)

شکل ۷ میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های سه آزمونه‌ای برای: الف) همه طرح‌های اختلاط، ب) طرح‌های اختلاط با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ج) طرح‌های اختلاط با ۱۵٪ میکروسیلیس، د) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف ماسه بازیافتی، و) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن بازیافتی، ه) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن و ماسه بازیافتی.

کیفیت ملات قدیمی احاطه کننده RCA و کیفیت دو ناحیه انتقال بین سطحی (Interfacial Transition Zone) (ITZ) بین ملات قدیمی و RCA (ITZ قدیمی) و بین ملات قدیمی و ملات جدید (ITZ جدید) از جمله عوامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن‌های بازیافتی می‌باشند. معمولاً ITZ قدیمی نسبت به ITZ جدید ضعیف‌تر است. بنابراین ITZ قدیمی می‌تواند به عنوان نقطه شروع و گسترش ترک‌ها و ایجاد خرابی‌ها در بتن‌های بازیافتی در نظر گرفته شود و این خود یکی از دلایل کاهش مقاومت این نوع بتن‌ها می‌باشد [39-40].

مقاومت کششی

همان طوری که در شکل (۸-الف) و همچنین جدول (٤) مشاهده

می‌گردد بیشترین مقدار مقاومت کششی مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۱ بوده که در آن ۵۰٪ شن طبیعی، ۵۰٪ ماسه طبیعی، بدون شن و ماسه بازیافتی است. کمترین مقدار مقاومت کششی هم مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۲۰ بوده که در آن ۵٪ شن طبیعی، ۵٪ ماسه طبیعی، ۴۵٪ شن بازیافتی و ۴۵٪ ماسه بازیافتی است.

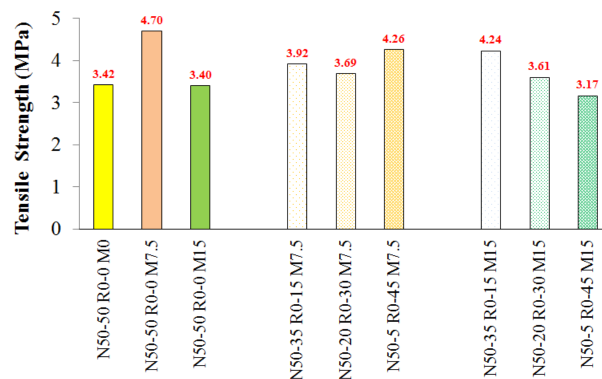
الف) نمونه‌های با ۷/۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شمارهٔ ۱ تا ۱۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد، مقدار مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش یافته و به ترتیب حدود ۱۷٪، ۲۱٪ و ۹٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شمارهٔ ۱) کاهش داشته است (شکل ۸–ب). در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش شن بازیافتی و جایگزینی آن با شن طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد، مقدار مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش‌یافته و به ترتیب حدود ۱۰٪، ۹٪ و ۳٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است (شکل ۸–ب). در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش همزمان شن و ماسه بازیافتی و جایگزینی همزمان آن با شن و ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد، مقدار مقاومت کششی نمونه‌ها، کاهش‌یافته و به ترتیب حدود ۱۳٪، ۱۴٪ و ۳۰٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است.

ب) نمونه‌های با ۱۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شمارهٔ ۱۱ تا ۲۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد، مقدار مقاومت کششی در برخی نمونه‌ها کاهش و در برخی نمونه‌ها افزایش یافته و به ترتیب حدود ۸۷٪ و ٦٪ افزایش و ۷٪ کاهش نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شمارهٔ ۱۱) نشان داده شده است (شکل ۸–ج).

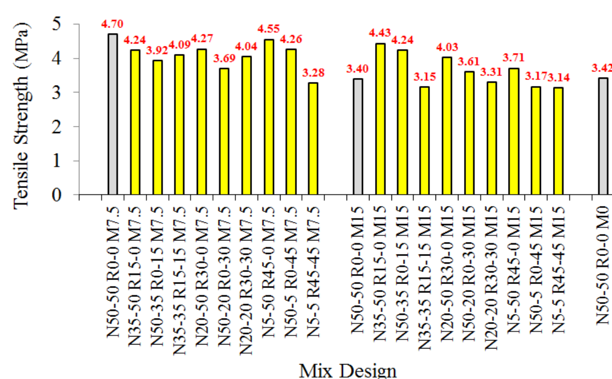
نتایج نشان می‌دهد در بین سه گروه جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی، گروه جایگزینی ماسه بازیافتی با ماسه طبیعی باعث افزایش در مقدار مقاومت کششی شده است. همچنین گروه جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی با شن و ماسه طبیعی باعث کاهش در مقاومت کششی شده است. گروه جایگزینی شن بازیافتی با شن طبیعی از نظر تأثیر بر مقاومت کششی بین دو گروه فوق قرار گرفته و نسبت به گروه ماسه بازیافتی تأثیر کمتری و نسبت به گروه شن و ماسه بازیافتی تأثیر را بیشتری در افزایش مقاومت کششی نشان می‌دهد.

ج) مقایسه نتایج نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس. با افزایش مقدار میکروسیلیس، رشد مقاومت فشاری کاهش داشته است (شکل ۸–د). مقایسه نمونه‌های سه گروه مختلف بازیافتی حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس (۵/۷٪ و ۱۵٪) نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس، مقاومت کششی در همه نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته در صورتی که در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس، مقاومت کششی در بیش از نیمی از نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است (شکل ۷–د). در نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۱ و ۱۱) و حاوی ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس، مقدار مقاومت کششی نسبت به نمونه مرجع (نمونه با طرح اختلاط شماره ۲۱) به ترتیب ۳۷٪ افزایش و ۱٪ کاهش داشته است.

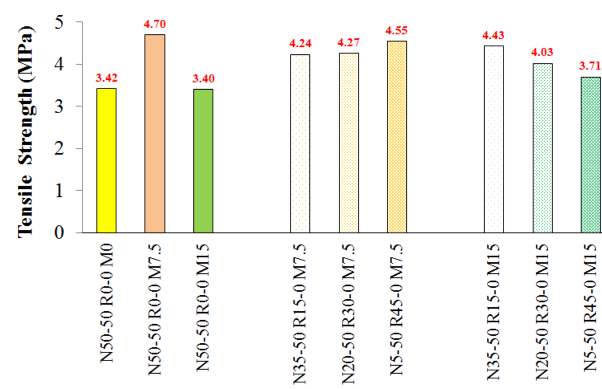
جالب این است که در نمونه با ۷/۵ درصد میکروسیلیس مقدار رشد مقاومت کششی نسبت به نمونه با ۱۵ درصد میکروسیلیس بیش از ۳۸٪ رشد مقاومت داشته است. در بررسی و مقایسه مقاومت کششی در گروه ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۱۳٪ کاهش داشته؛ در نمونه‌های با ۳۰ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۲۷٪ افزایش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۲۰٪ کاهش داشته است.



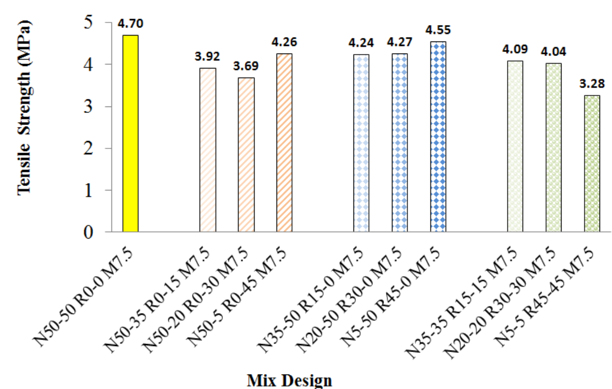
(د)



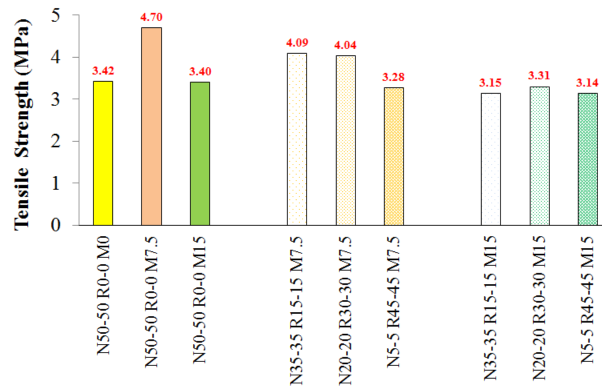
(الف)



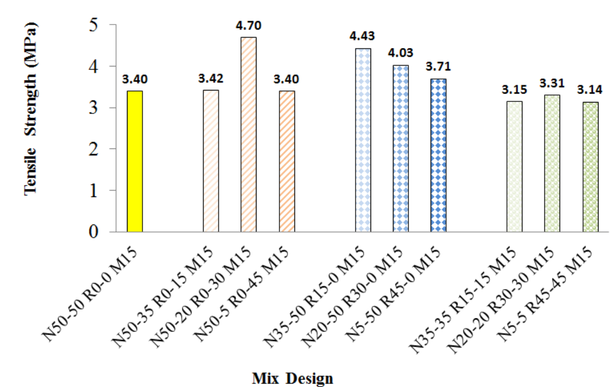
(و)



(ب)



(ه)



(ج)

شکل ۸ میانگین مقاومت کششی نمونه‌های سه آزمونه‌ای برای: الف) همه طرح‌های اختلاط، ب) طرح‌های اختلاط با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ج) طرح‌های اختلاط با ۱۵٪ میکروسیلیس، د) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف ماسه بازیافتی، و) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن بازیافتی، ه) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن و ماسه بازیافتی

در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی تقریباً صعودی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی تقریباً نزولی داشته است.

در بررسی و مقایسه مقاومت کششی در گروه شن بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۵٪ افزایش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ٦٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۱۸٪ کاهش

داشته است (شکل ۸-و). در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی صعودی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی نزولی داشته است (شکل ۸-و).

در بررسی و مقایسه مقاومت کششی در گروه شن و ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۲۳٪ کاهش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۱۸٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی به مقدار ٤٪ کاهش داشته است (شکل ۷-ه). در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی روندی نزولی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی روندی تقریباً ثابت داشته است (شکل ۷-ه).

با توجه به مقایسه همه نمونه‌های بازیافتی معلوم گردید که نمونه حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس و ۳۰٪ ماسه بازیافتی، بیشترین مقدار مقاومت کششی و معادل با ٤/۷ مگاپاسکال را به خود اختصاص داده و بهترین طرح اختلاط از این حیث بوده و در رده بعدی نمونه حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ٤٥٪ شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی و معادل با ٤/۵۲ مگاپاسکال را به خود اختصاص داد.

ضعیف بودن ITZ قدیمی نسبت به ITZ جدید باعث کاهش مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی شده و این موضوع با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی بیشتر می‌شود. همچنین با توجه به خواص فیزیکی RCA، مانند سطوح ناهموار آنها، این سنگدانه‌ها می‌توانند شرایط ریز ترک‌ها را در ناحیه انتقال سطحی (ITZ) بهبود بخشند و کشش شکافتن بتن را افزایش دهند [39-40].

مقاومت خمشی تیرهای منشوری

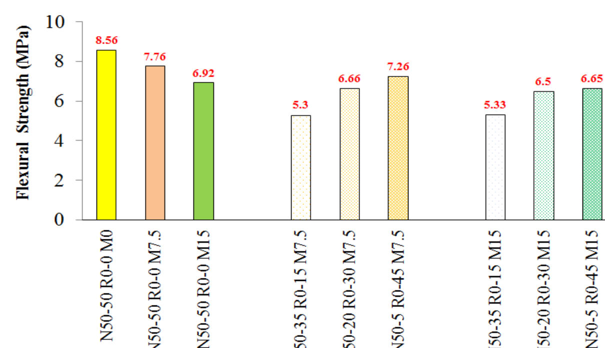
همان‌طوری که در شکل (۹-الف) مشاهده می‌گردد بیشترین مقدار مقاومت خمشی تیرهای منشوری مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۲۱ بوده که در آن ۵۰٪ شن طبیعی، ۵۰٪ ماسه طبیعی و بدون شن و ماسه بازیافتی و میکروسیلیس است. کمترین مقدار مقاومت خمشی هم مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۳ بوده که در آن ۵۰٪ شن طبیعی، ۳۵٪ ماسه طبیعی، بدون شن بازیافتی و ۱۵٪ ماسه بازیافتی است.

الف) نمونه‌های با ۷/۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۱ تا ۱۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درصد، مقدار مقاومت خمشی نمونه‌ها، کاهش‌یافته و به ترتیب ۳۲٪، ١٤٪ و ٦٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شماره ۱) کاهش داشته است. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش شن بازیافتی و جایگزینی آن با شن طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درصد، در حالتی که ماسه بازیافتی جایگزین ماسه طبیعی نشده است، مقدار مقاومت خمشی تیرهای منشوری نمونه‌ها کاهش یافته و به ترتیب ۵٪، ۳٪ و ۷٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش همزمان شن و ماسه بازیافتی و جایگزینی همزمان آن با شن و ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها، کاهش یافته و به ترتیب ۲۵٪، ۲۳٪ و ۲٦٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است (شکل ۹-ب).

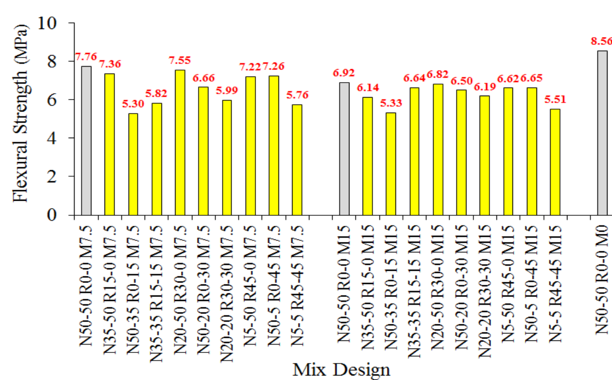
ب) نمونه‌های با ۱۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۱۱ تا ۲۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درصد، مقدار مقاومت خمشی کاهش یافته و به ترتیب حدود ۲۳٪، ٦٪ و ٤٪ کاهش نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شماره ۱۱) نشان داده شده است. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس، با افزایش شن بازیافتی و جایگزینی آن با شن طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درصد، در حالتی که ماسه بازیافتی جایگزین ماسه طبیعی نشده است، مقدار مقاومت خمشی نمونه‌ها کاهش داشته و به ترتیب حدود ۱۱٪، ۱٪ و ٤٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس، با افزایش همزمان شن و ماسه بازیافتی و

جایگزینی همزمان آن با شن و ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد، مقدار مقاومت خمشی کاهش داشته و حدود ۴٪، ۱۱٪ و ۲۰٪ کاهش نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی داشته است (شکل ۹–ج).

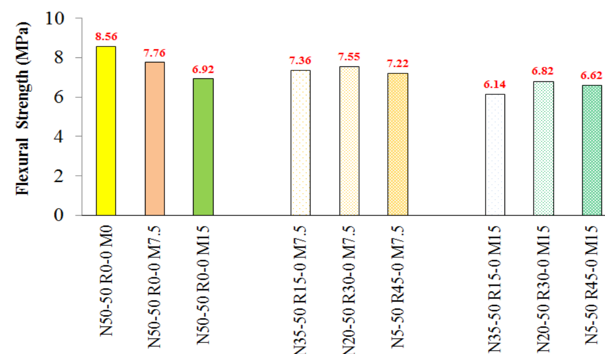
با توجه به نتایج فوق مشخص می‌شود که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی، در همه نمونه-ها باعث کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها شده است. نتایج نشان می‌دهد در بین سه گروه جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی، گروه جایگزینی شن بازیافتی با شن طبیعی باعث کاهش کمتری در مقدار مقاومت خمشی شده است. همچنین گروه جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی با شن و ماسه طبیعی باعث کاهش بیشتری در مقاومت خمشی شده است. گروه جایگزینی ماسه بازیافتی با ماسه طبیعی از نظر تأثیر بر مقاومت خمشی بین دو گروه فوق قرار گرفته و نسبت به گروه شن بازیافتی تأثیر بیشتری و نسبت به گروه شن و ماسه بازیافتی تأثیر کمتری در کاهش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.



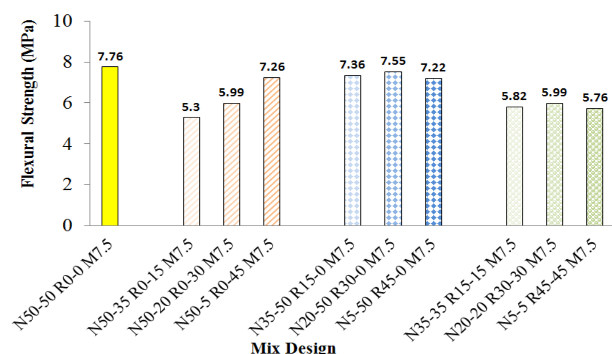
(د)



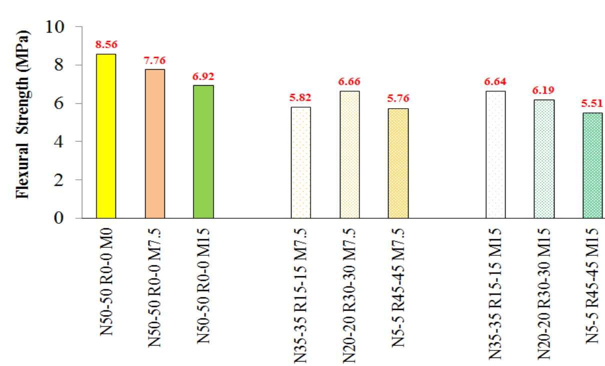
(الف)



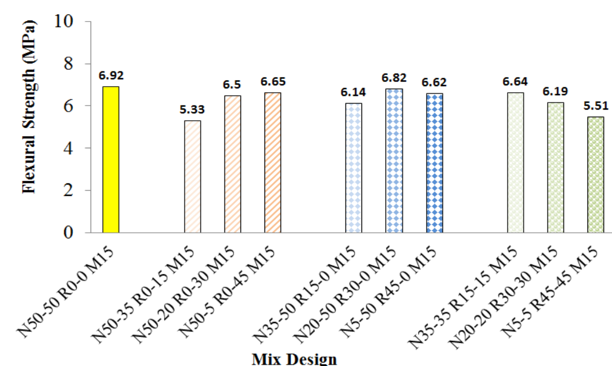
(و)



(ب)



(ه)



(ج)

شکل ۹ میانگین مقاومت خمشی نمونه‌های سه آزمونه‌ای برای: الف) همه طرح‌های اختلاط، ب) طرح‌های اختلاط با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ج) طرح‌های اختلاط با ۱۵٪ میکروسیلیس، د) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف ماسه بازیافتی، و) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن بازیافتی، ه) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن و ماسه بازیافتی

ج) مقایسه نتایج نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس.
مقایسه نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی (نمونه‌های با طرح اختلاط شماره ۱، ۱۱ و ۲۱) نشان می‌دهد که افزایش مقدار میکروسیلیس به مقدار ۷/۵٪ و ۱۵٪ (در نمونه‌های با طرح اختلاط شماره ۱ و ۱۱)، باعث کاهش مقاومت خمشی به مقدار حدود ۹٪ و ۱۹٪ نسبت به نمونه مرجع بدون میکروسیلیس (نمونه با طرح اختلاط شماره ۲۱) شده است. به عبارتی با افزایش مقدار میکروسیلیس، رشد مقاومت خمشی کاهش داشته است. مقایسه نمونه‌های سه گروه مختلف بازیافتی، حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس (۷/۵٪ و ۱۵٪) نشان می‌دهد که هم در نمونه‌های حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس، مقاومت خمشی در همه نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته و هم در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس، مقاومت خمشی در همه نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته است. در نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی و حاوی ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس، مقدار مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۹٪ و ۱۹٪ کاهش داشته است. جالب این است که در نمونه با ۷/۵ درصد میکروسیلیس مقدار رشد مقاومت خمشی نسبت به نمونه با ۱۵ درصد میکروسیلیس ۱۲٪ رشد مقاومت خمشی داشته است (شکل ۹-د).

در بررسی و مقایسه مقاومت خمشی در گروه ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۱٪ افزایش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۲٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ۴۵ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۸٪ کاهش داشته است. در نمونه‌های با ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی روندی صعودی داشته است (شکل ۹-د).

در بررسی و مقایسه مقاومت خمشی در گروه شن بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۱۷٪ کاهش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۱۰٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ۴۵ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۸٪ کاهش داشته است. در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی روندی تقریباً صعودی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی روندی تقریباً صعودی داشته است (شکل ۹-و). در بررسی و مقایسه مقاومت خمشی در گروه شن و ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۱٤٪ افزایش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۷٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ٤٪ کاهش داشته است. در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی روندی تقریباً نزولی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی روندی نزولی داشته است (شکل ۹-ه).

با توجه به مقایسه همه نمونه‌های بازیافتی معلوم گردید که نمونه حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ۳۰٪ شن بازیافتی، بیشترین مقدار مقاومت خمشی و معادل با ۷/۵۵ مگاپاسکال را به خود اختصاص داده و بهترین طرح اختلاط از این حیث بوده و در رده بعدی، نمونه حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی و معادل با ۷/۳٦ مگاپاسکال را به خود اختصاص داد. با توجه به خواص فیزیکی RCA مانند سطح ناهموار آنها، استفاده از این سنگدانه‌ها انسجام بین اجزای بتن در ITZ را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کنترل انتشار ترک در زمینه با ایجاد اترینگیت سوزنی شکل نیز یکی از دلایل افزایش مقاومت خمشی بتن است [40-41].

بهینه‌یابی چندمتغیره

با استفاده از نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها، یک روش بهینه‌یابی مورد مطالعه قرار گرفت، تا مناسبترین طرح اختلاط از نظر خصوصیات مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی) انتخاب گردد. یک روش بهینه‌یابی اساساً از یک تابع عملکرد برای تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود. در این تابع متغیرهای مستقل و

وابسته بر فرمولاسیون و نتیجه تصمیم نهایی تأثیر می‌گذارند. مصالح تشکیل دهنده طرح‌های اختلاط، متغیرهای مستقل هستند، در حالی که خواص مکانیکی متغیرهای وابسته‌ای هستند که بر اساس متغیرهای مستقل تغییر می‌کنند. اگر فقط یک معیار وجود داشته باشد، حداکثر یا حداقل مقدار آن به راحتی تعیین می‌شود و نیازی به بهینه‌یابی نیست، اما از آنجایی که در این تحقیق معیارهای مختلفی همچون مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی مدنظر است، بایستی طرح‌های اختلاطی با بیشترین مقاومت از طریق بهینه‌یابی انتخاب شوند. از آنجایی که بهینه‌یابی معمولاً شامل تابع هدف است، در این تحقیق از یک روش بهینه‌یابی چند متغیره استفاده شده است که تابع مطلوبیت نامیده می‌شود [42]. مقدار این تابع بین ۰ و ۱ است. مقدار تابع مطلوبیت با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد [43].

$$d_j = \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j}\right]^{t_j} \qquad (۳)$$

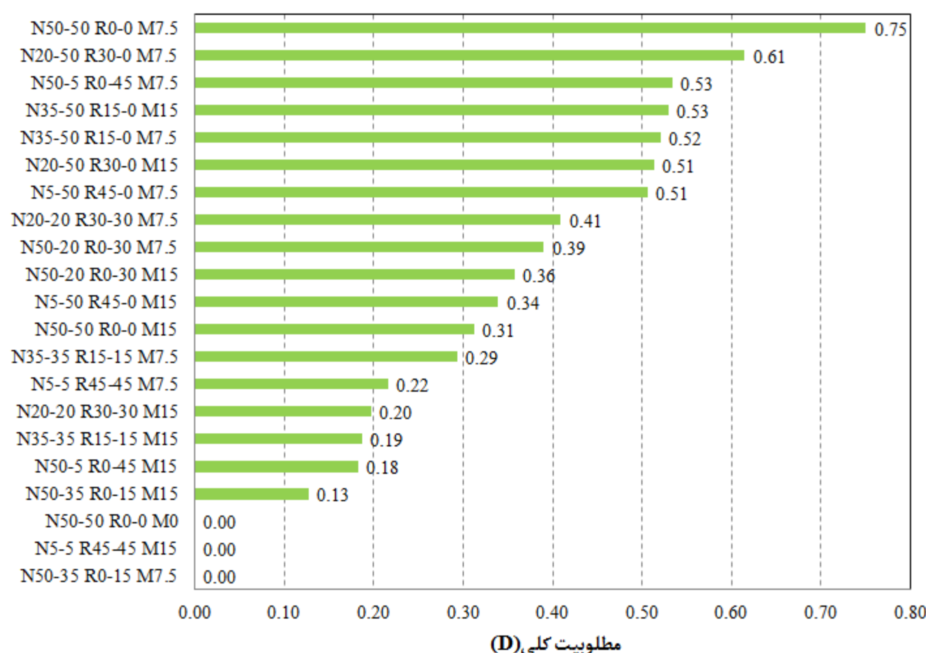
که در آن، d_j مقدار تابع مطلوبیت، Y_j پاسخ و $\min f_j$ و $\max f_j$ به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار بین پاسخ‌های مربوط به معیار j^{th} می‌باشد. توان t_j پارامتر وزنی برای معیار j^{th} است. از آنجایی که معیارهای این تحقیق دارای اهمیت یکسانی می‌باشند، پارامتر وزنی برای تمامی آنها مساوی ۱ در نظر گرفته شد. تابع مطلوبیت برای معیارهایی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی که حد بالای آن مطلوب می‌باشد، با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد. سپس، تابع مطلوبیت کلی (D) به عنوان تابع هدف مطابق با رابطه (٤) در نظر گرفته شد [43].

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \ldots \times d_m)^{\frac{1}{m}} \qquad (٤)$$

که در آن، m تعداد معیارها است. از آنجایی که در این تحقیق معیارهای تصمیم‌گیری شامل خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی است، m =4 در نظر گرفته شد. هر قدر مقدار تابع مطلوبیت کلی برای یک طرح اختلاط بیشتر باشد، نشان دهنده آن است که این طرح اختلاط مقاومت مکانیکی بیشتر دارد. نتایج مربوط به بهینه‌یابی در جدول (٦) نشان داده شد. برای طرح اختلاطی که تابع مطلوبیت مربوط به حتی یک معیار برای آن صفر به دست آمده باشد، تابع مطلوبیت کلی آن نیز صفر خواهد شد.

جدول ٦ میزان مطلوبیت طرح‌های اختلاط

طرح اختلاط	مطلوبیت			مطلوبیت کلی
	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	
N50-50 R0-0 M7.5	0.87	1.00	0.75	0.75
N20-50 R30-0 M7.5	0.63	0.72	0.69	0.61
N35-50 R15-0 M15	0.37	0.83	0.26	0.53
N50-5 R0-45 M7.5	0.35	0.72	0.60	0.53
N35-50 R15-0 M7.5	1.00	0.71	0.63	0.52
N20-50 R30-0 M15	0.41	0.57	0.47	0.51
N5-50 R45-0 M7.5	0.30	0.90	0.59	0.51
N20-20 R30-30 M7.5	0.39	0.58	0.21	0.41
N50-20 R0-30 M7.5	0.48	0.35	0.42	0.39
N50-20 R0-30 M15	0.62	0.30	0.37	0.36
N5-50 R45-0 M15	0.39	0.37	0.40	0.34
N50-50 R0-0 M15	0.24	0.17	0.50	0.31
N35-35 R15-15 M7.5	0.62	0.61	0.16	0.29
N5-5 R45-45 M7.5	0.47	0.09	0.14	0.22
N20-20 R30-30 M15	0.20	0.11	0.27	0.20
N35-35 R15-15 M15	0.66	0.01	0.41	0.19
N50-5 R0-45 M15	0.49	0.02	0.41	0.18
N50-35 R0-15 M15	0.14	0.71	0.01	0.13
N50-35 R0-15 M7.5	0.56	0.50	0.00	0.00
N50-50 R0-0 M0	0.10	0.18	1.00	0.00
N5-5 R45-45 M15	0.00	0.00	0.06	0.00



شکل ۱۰ مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط به ترتیب نزولی

میزان مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط به ترتیب نزولی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. تابع مطلوبیت کلی برای طرح‌های اختلاط N50-50 R0-0 M0، N5-5 R45-45 M15 و N50-35 R0-15 M7 برابر صفر به دست آمد. این نتیجه بیان کننده آن است که استفاده از این طرح‌های اختلاط کمترین مقدار خواص مکانیکی را به طور همزمان به دنبال خواهند داشت. در بین طرح‌های اختلاط بازیافتی که بیشترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند، طرح‌های اختلاط حاوی ۳۰٪ شن بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۴۵٪ ماسه بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۱۵٪ شن بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۱۵٪ ماسه بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس، دیده می‌شوند. جالب این است که دو طرح اخیر با ۱۵٪ شن بازیافتی و ۱۵٪ ماسه بازیافتی یکی با ۷/۵٪ میکروسیلیس و دیگری با ۱۵٪ میکروسیلیس نتایج مشابهی را از نظر مطلوبیت به خود اختصاص داده‌اند.

نتیجه‌گیری

با جایگزینی ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درصد سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی در چهار گروه که شامل نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی، با ماسه بازیافتی، با شن بازیافتی و با شن و ماسه بازیافتی است. برای جبران کاهش مقاومت ناشی از جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، از میکروسیلیس در درصدهای مختلف ۷/۵ و ۱۵ درصد و فوق روان کننده در طرح‌های اختلاط استفاده شد. با جایگزینی درصدهای فوق - الذکر تعداد ۲۱ طرح اختلاط ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. با انجام آزمایش‌ها مختلف مقاومت مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. همچنین با بررسی چند متغیره، بهترین طرح‌ها از نقطه نظر کلی نیز مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

۱. افزودن میکروسیلیس به مقدار ۷/۵ و ۱۵ درصد به نمونه‌های با سنگدانه طبیعی باعث افزایش مقاومت فشاری به ترتیب به مقدار ۱٦۳٪ و ۲۹٪ گردید.
۲. جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی، باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شد. در نمونه‌های با ۷/۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی ماسه بازیافتی باعث کاهش بیشتری در مقدار مقاومت فشاری شده، جایگزینی شن بازیافتی باعث کاهش کمتری در مقاومت فشاری شده و نتایج مقاومت فشاری جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی، بین دو گروه فوق قرار گرفته است. در نمونه‌های با ۱۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی ماسه بازیافتی باعث افزایش بیشتری در مقدار مقاومت فشاری

شده، جایگزینی شن بازیافتی باعث افزایش کمتری در مقاومت فشاری شده و نتایج مقاومت فشاری جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی، بین دو گروه فوق قرار گرفته است.

۳. جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی، باعث کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها شد. در نمونه‌های با ۷/۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی ماسه بازیافتی باعث کاهش بیشتری در مقدار مقاومت کششی شده، جایگزینی شن بازیافتی باعث کاهش کمتری در مقاومت کششی شده و نتایج مقاومت کششی جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی، بین دو گروه فوق قرار گرفته است. در نمونه‌های با ۱۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی شن بازیافتی باعث افزایش بیشتری در مقدار مقاومت کششی شده، جایگزینی ماسه بازیافتی باعث افزایش کمتری در مقاومت کششی شده و نتایج مقاومت کششی جایگزینی همزمان شن ماسه بازیافتی، باعث کاهش در مقاومت کششی نمونه‌ها شد.

٤. جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی، باعث کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها شد. در نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی شن و ماسه بازیافتی باعث کاهش بیشتری در مقدار مقاومت خمشی شده، جایگزینی شن بازیافتی باعث کاهش کمتری در مقاومت خمشی شده و نتایج مقاومت خمشی جایگزینی ماسه بازیافتی، بین دو گروه فوق قرار گرفته است.

۵. در نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، با افزایش درصد جایگزینی شن بازیافتی یا ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی روندی تقریباً افزایشی داشته و در نمونه-های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، با افزایش درصد جایگزینی شن و ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی تقریباً کاهشی داشت.

٦. در بین کل طرح‌های اختلاط بهترین طرح اختلاط از نظر مقاومت فشاری، طرح حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ شن بازیافتی، از نظر مقاومت کششی، طرح حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ٤٥٪ شن بازیافتی، از نظر مقاومت خمشی، طرح حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ۳۰٪ شن بازیافتی مشخص شدند.

۷. با بررسی چند متغیره خواص مکانیکی نمونه‌های بتن، مشخص گردید که طرح‌های اختلاط حاوی ۳۰٪ شن بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ٤٥٪ ماسه بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۱۵٪ شن بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۱۵٪ ماسه بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس، در بین طرح‌های اختلاط بازیافتی، بیشترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند. جالب این است که دو طرح اخیر با ۱۵٪ شن بازیافتی و ۱۵٪ ماسه بازیافتی یکی با ۷/۵٪ میکروسیلیس و دیگری با ۱۵٪ میکروسیلیس نتایج مشابهی را از نظر مطلوبیت به خود اختصاص داده‌اند.

مراجع

[1] M. Limbachiya, M. Seddik Meddah, Y. Ouchagour, "Performance of portland/silica fume cement concrete produced with recycled concrete aggregate," *ACI Materials Journal*, vol. 109, pp. 91–100, 2012.

[2] A.K. Tamimi, J.A. Abdalla, Z.I. Sakka, "Prediction of long-term chloride diffusion of concrete in harsh environment," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 829–836, 2008.

[3] A.E.B. Cabral, V. Schalch, D.C. Molin, J.L.D. Ribeiro, "Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 421–430, 2010.

[4] S.W. Tabsh, , A.S. Abdelfatah, "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1163–1167, 2009.

[5] A.S. Abdelfatah, S.W. Tabsh, "Review of research on and implementation of recycled concrete aggregate in the GCC," Advances in Civil Engineering, 2011.

[6] M. Tavakoli, P. Soroushian, "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate," *Material Journal*, vol. 93, no. 2, pp. 178–181, 1996.

[7] A. K. Padmini, K. Ramamurthy, M. S. Mathews, "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 829–836, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006, 2009,

[8] I. B. Topçu, "Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 12, pp. 1817–1823, Dec., doi: 10.1016/S0008-8846(97)00190-7, 1997.

[9] J. T. Smith, "Recycled concrete aggregate - A viable aggregate source for concrete pavements," UWSpace. http://hdl.handle.net/10012/4900, 2010.

[10] T. C. Hansen, H. Narud, "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate," *oncrete International*, vol. 5, no. 1, pp. 79–83, 1983.

[11] J. de Brito, N. Saikia, "Recycled aggregate in concrete: use of industrial," Construction and Demolition Waste, Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, vol. 1, ISBN 9781447145394, 2009.

[12] D.D. Nguyen, D.T. Nguyen, T.H. Cao, V.T. Phan, "Evaluating the possibility of replacing natural fine aggregates in concrete with recycled aggregates," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 11, no. 6, pp. 7805-7808, 2021,

[13] R. M. Salem, E. G. Burdette, N. M. Jackson, "Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete," *Material Journal*, vol. 100, no. 3, pp. 216–221, 2003.

[14] V. Tam, X. Gao, C. Tam, "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1195–1203, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.025, 2005.

[15] S. Lotfi, J. Deja, P. Rem, R. Mróz, E. Van Roekel, H. Van Der Stelt, "Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 87, pp. 117–125, doi: 10.1016/j.resconrec.2014.03.010, 2014.

[16] M.C. Limbachiya, E. Marrocchino, A. Koulouris, "Chemical–mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate," *Waste Management*, vol. 27, pp. 201–208, 2007.

[17] K. Rahal, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate," *Building and Environment*, vol. 42, pp. 407–415, 2007.

[18] C. Zhou, Z. Chen, "Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 134, pp. 497–506, 2017.

[19] M. Limbachiya, M.S. Meddah, Y. Ouchagour, "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 439-449, 2012.

[20] R.V. Silva, J. De Brito, R.K. Dhir "Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2171–2186, 2016.

[21] M. Gomes, J. De Brito, "Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance," *Materials and Structures*, vol. 42, pp. 663–675, 2009.

[22] K.H. Younis, A.A. Amin, H.G. Ahmed, et al., "Recycled aggregate concrete including various contents of metakaolin: mechanical behavior," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, pp. 1–17, doi.org/10.1155/2020/8829713, 2020.

[23] N.K. Bui, T. Satomi, H. Takahashi, "Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 496–507, 2018.

[24] M.L. Berndt, "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2606–2613, 2009.

[25] H., Dilbas, S. M. Sim, Ö. Çakir, "An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume," *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 50–59, 2014.

[26] A. Ismail, K.H. Younis, S. Maruf, "Recycled aggregate concrete made with silica fume: experimental investigation," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 8, pp.1136–1143, 2020.

[27] P. Hosseini, A.R. Khalo, M.M. M. Khodavirdi Zanjani, "Study on the construction of self-compacting concrete using recycled aggregates", *Concrete Research Journal*, third year/number on, 2008, (In Persin).

[28] M. Moghimi, J. Baranjian, K, Nemati, "Investigation of the mechanical properties of recycled concrete using crushed concrete," Second National Congress of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran , 2004, (In Persin).

[29] J. De Brito, J. Ferreira, J. Pacheco, D. Soares, M. Gurreiro, "Structural, material, mechanical and durability properties and behavior of recycled aggregates concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 6, pp. 1-16, 2016.

[30] A. Apurva, V.S. Fursule, Shingade, "Experimental study of concrete using recycled aggregate with nano silica," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 8, pp. 950-953, 2017.

[31] ACI 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)V, ACI Committee 318", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., 2014.

[32] ASTM C150/C150M-17., "Standard Specification for Portland cement," ASTM International, West Conshohocken, PA., 2017.

[33] M. D. J. Sanchez, P. A. Gutierrez, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 872–877, 2009.

[34] ASTM C125-19, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

[35] ASTM C131/C131M-14, "Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine," 2006.

[36] ASTM C 39/C 39M-03, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens," 2003.

[37] ASTM C 496/C 496M-11, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens," 2011.

[38] ASTM C1609/C1609M-19, "Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)," 2019.

[39] S.W. Tabsh, A.S. Abdelfatah, "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1163–1167, 2009.

[40] L. Senas, C. Priano, S. Marfil, "Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 498–505, 2016.

[41] Z.H. Duan, C.S. Poon, "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars," *Materials Design*, vol. 58, pp. 19–29, 2014.

[42] S.M. Zabihi, H.R. Tavakoli, "Evaluation of monomer ratio on performance of GGBFS-RHA alkali-activated concretes," *Construction Building Material*, vol. 208, pp. 326– 332, 2019.

[43] O. Sengul, M. A. Tasdemir, "Compressive strength and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag," *Material Civil Engineering*, vol. 21, pp. 494–501, 2009.